

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17486

研究課題名(和文) シングルショット縦方向位相空間測定のためのチェレンコフリングカメラの開発

研究課題名(英文) Development of linear focal cherenkov-ring camera for single shot observation of longitudinal phase space distribution

研究代表者

南部 健一 (Nanbu, Kenichi)

東北大学・電子光学研究センター・技術専門職員

研究者番号：00422072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：100フェムト秒以下の極短バンチを生成する加速器の性能向上のためには、加速前のビームパラメータを把握することが必要不可欠である。本研究では、チェレンコフ光の放射角と電子ビームのエネルギーの間に強い相関関係があることを応用し、従来よりも高いビームエネルギーに対応できる縦方向位相空間測定システムの開発を目指して研究を行った。測定エネルギー範囲の拡張は、使用するラジエーターの屈折率を最適化することで実現できることが示唆された。また光検出器までの輸送に関しては、原理的に発生したチェレンコフ光すべてを輸送することが可能な光学系を開発・評価し、その性能を確認することが出来た。

研究成果の概要(英文)：An accelerator based THz light source needs the very short electron pulse such as a few hundred femtosecond. To improve the performance of those light source, it is indispensable to understand the beam dynamics in the injector section before acceleration. In this work, we have been studied the longitudinal phase space measurement system (LFC-Camera) for quasi-relativistic electron beam by Cherenkov light observation. Cherenkov radiator with lower refractive index may contribute to expand the energy measuring range for the LFC-Camera. We designed new optical system for Cherenkov light, which can preserve time information. To demonstrate the performance of it, we evaluated it using Cherenkov light from electron beam at t-ACTs. The data we have obtained suggest that the time resolution of optical system was less than 200 fsec including wavelength dispersion in air and electron beam size.

研究分野：加速器科学

キーワード：ビーム診断 縦方向位相空間測定 チェレンコフ放射

1. 研究開始当初の背景

100 フェムト秒程度の極めて短い電子バンチを生成する加速器の性能向上のためには、ビーム生成から加速までの非相対論的領域におけるビームダイナミクスの理解が必要不可欠であり、そのためこのようなビームのプロパティを把握することは極めて重要であるため様々なビーム診断システムが開発されている。例えばバンチ長計測では、遷移放射をストリークカメラなどの時間分解が出来る測定器で直接観測する手法や、RF ディフレクターを用いて軌道上に横方向の磁場を誘起しビームを掃引することで縦方向プロファイルを横方向のプロファイルに変換して測定する手法などがある。またバンチの形状因子からバンチ長を得る手法なども研究されている。また縦方向位相空間測定に関しては、偏向電磁石下流等の運動量分散の大きな場所にスクリーン等の電子分布を光に変換する素子を設置し、電子ビームのエネルギー分布を発生した光の水平方向分布に変換し、それをストリークカメラ等で測定する手法が考案されていたが、これらの手法は相対論的ビームの診断を目的としており、そのまま数 MeV 程度のビーム診断に用いることはできないため、2MeV 程度の比較的低いエネルギーに特化したチェレンコフ光計測による縦方向位相空間測定システムの開発を行っていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子銃などから引き出された非相対論的電子ビームが誘電体中を通過するときに放射するチェレンコフ光を測定することで、電子ビームの縦方向位相空間分布を直接計測するチェレンコフリングカメラの測定エネルギー範囲の拡張を目指して、チェレンコフラジエーターと輸送光学系を開発することである。図1にチェレンコフリングカメラの概念図を示した。

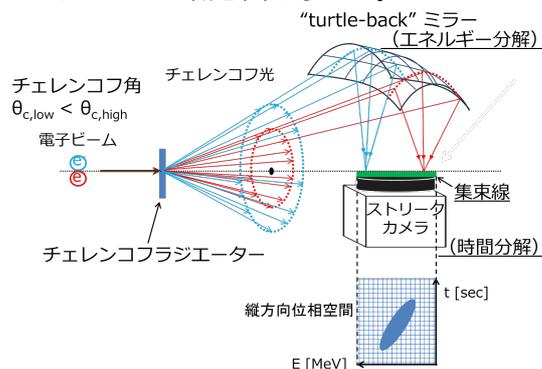


図1 チェレンコフリングカメラの概念図

3. 研究の方法

チェレンコフリングカメラの測定エネルギー範囲を拡張するためには、ラジエーターと光学系に要求される仕様を明らかにし、チェレンコフラジエーターの最適化を行うとともに、チェレンコフ光を光検出器まで輸送

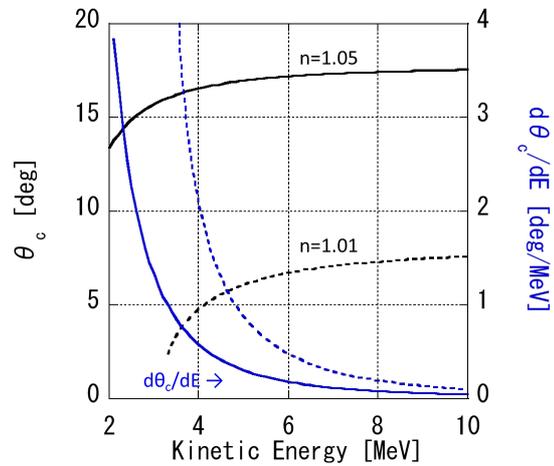


図2 チェレンコフ角の電子ビームエネルギー依存性

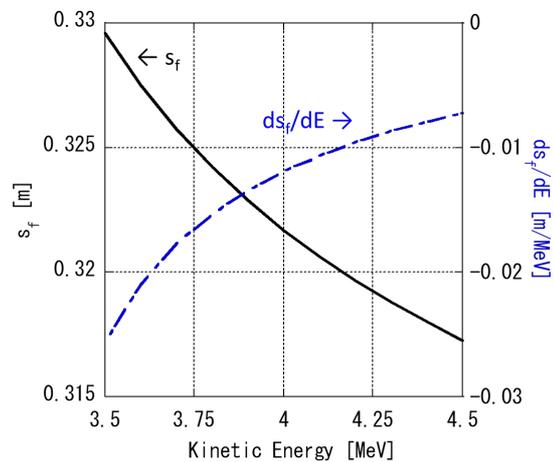


図3 焦点位置のエネルギー依存性

する光学系を開発しなければならない。また開発したコンポーネントは東北大学電子物理学研究センターの試験加速器 (t-ACTS) においてビーム試験を行う。そのため t-ACTS のビームラインを仮定して、コンポーネントの開発を進めた。またビーム試験では、実際にチェレンコフ光を発生させ、これを用いて光輸送実験を行い光学系の評価を行う。

4. 研究成果

目標とする高いエネルギー分解能を実現するためには、図2から明らかのようにチェレンコフ角と電子の速度の相関が強い、すなわち $d\theta_c/dE$ が比較的大きな領域を用いる必要がある。電子ビームのエネルギーを 4MeV と仮定すると、ラジエーターの屈折率を 1.01 程度にすれば、図3で示すように turtle-back ミラーの焦点位置のエネルギー依存性は 12 mm/MeV 程度となり、従来の測定セットアップの 20 mm/MeV と比べると若干小さくなるためエネルギー分解能が低下する可能性があるが、縦方向位相空間分布の測定は可能であると判断した。ラジエーターの屈折率を小さくすればエネルギー依存性を増大させること

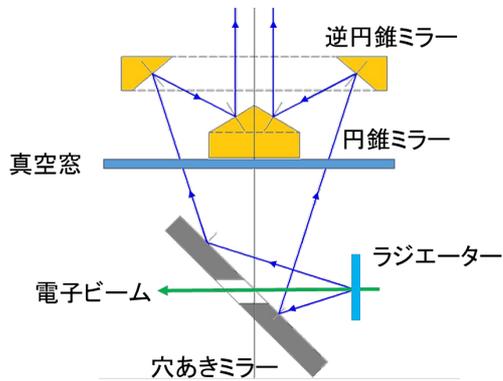


図4 開発したチェレンコフ光輸送光学系

ができるが、チェレンコフ放射の光量は、屈折率に比例するため光量とエネルギー分解能を考慮し、ラジエーターの屈折率は 1.01 が適当であると結論付けた。本ラジエーターは、このような低屈折率で多くの製造実績がある疎水性シリカエアロゲルを用いれば実現可能であると考えられる。

また屈折率 1.01 のラジエーターを用いた場合、電子ビームのエネルギーを 4MeV と仮定すればチェレンコフ角は 5° 程度となり、turtle-back ミラーとラジエーター間の距離を取る必要があるが、ビームラインにミラーを設置することは可能であると判断した。一方 Turtle-back ミラーには高い設置精度が要求されるが、調整の指標がないため、位置調整が難しいという課題があった。そこで位置調整が容易な光学系を適用できないか検討を行い、穴あき平面ミラーでチェレンコフ光を取り出しチェレンコフ光の波面に対して垂直に光検出器を設置し、直接チェレンコフ光を測定する方法を検討することにした。シミュレーションの結果、turtle-back ミラーを用いた方式と比較すると電子ビームのエミッタンスを考慮した場合、エネルギー分解能、時間分解能共に劣化してしまうため、縦方向位相空間の測定が困難になることが明らかとなったが、その一方でエネルギー分解能を犠牲にすることで、時間分解能を飛躍的に向上できることに気が付きこれについて

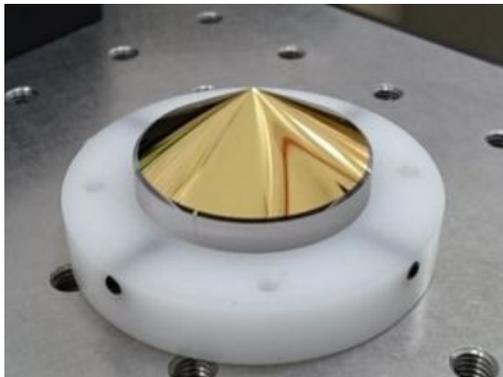


図5 試作した円錐ミラー

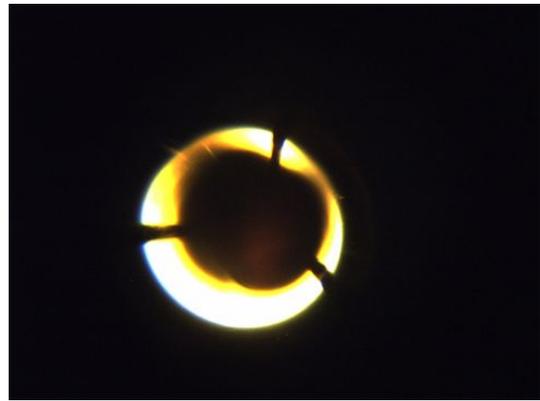


図6 約 10m 輸送したチェレンコフ光の写真

検討を進めた。その結果、適切な角度の円錐ミラーを組み合わせることで、円錐状に放射されるチェレンコフ光を疑似的な平行光に変換でき、波面を壊さずに光検出器まで輸送できる光学系(図4)を開発することができた。

チェレンコフ光はその角度広がりや遷移放射光などと比べて極めて大きいため、放射されるすべてのチェレンコフ光を輸送することは困難であったが、開発した光学系を用いれば、原理的には放射されるすべてのチェレンコフ光を時間情報の劣化なしで輸送することが可能となり、縦方向位相空間分布測定はもとより、バンチ長計測などへの展開が期待された。そこで本光学系の試作時のパラメータは、時間分解能の検証に特化したものとして試作することとした。試作したミラーの母材はガラスで、面精度は $1/4$ である。試作したミラーの写真を図5に示す。

レイトレースを用いて本光学系の時間分解能の見積を行い、ビームエミッタンスなどを考慮すると、チェレンコフ光を 10m 輸送した場合の時間分解能は 182 フェムト秒と見積もられた。また空気中を 10m 輸送すると、そこでの波長分散により時間分解能が悪化するため、バンドパスフィルタ等で波長を制限する必要がある。フィルタなしの場合は波長分散の影響により時間分解能は 549 フェムト秒であるが、例えばバンドパスフィルタ(550 ± 25nm)を用いた場合は、39 フェムト秒まで改善できることがわかった。これらに光検出器であるストリークカメラの時間分解能を考慮した測定系全体での時間分解能は、最も良い条件で 200 フェムト秒程度と見積もられた。

開発した光学系の妥当性を検証するために、最もバンチが圧縮されている条件でビーム加速を行い、そのビームから得られるチェレンコフ光を用いて光輸送実験及びバンチ長測定実験を行った。光輸送に関しては、補正レンズが必要となってしまったが、10m 下流の光検出器までチェレンコフ光を輸送することができた。図6に 10m 輸送したチェレンコフ光の写真を示す。バンチ長測定実験に

関しては、残念ながらストリークカメラの掃引回路が故障してしまい、最も時間分解能が良い条件で測定できなかった。しかしながら原理的な時間分解能は遷移放射を用いた場合の400フェムト秒程度に対して本測定手法では前述したように200フェムト秒程度まで改善できることが分かっており、掃引速度を落としたバンチ長測定結果から、遷移放射の場合は450フェムト秒程度であったものが、本光学系での測定では250フェムト秒程度となり、時間分解能が改善していることが明らかとなった。また本光学系の時間分解能は電子ビームのエミッタンスに大きく依存しており、ビームエミッタンスを小さくすることで約200フェムト秒から130フェムト秒程度まで改善できることがシミュレーションから示唆されたが、これらの確認は今後の課題とした。

研究期間内に、チェレンコフリングカメラを用いた縦方向位相空間分布測定を行うことまで至らなかったが、新たに開発したチェレンコフ光輸送光学系に関しては、ビーム試験を行い、時間分解能について評価することができた。これはバンチ長計測などに応用可能であると考えられる。またチェレンコフ光をすべて輸送できるという特徴を生かし、様々なビーム診断への展開が期待できると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1. "Study of Cherenkov Radiation from Thin Silica Aerogel", Ken-ichi Nanbu, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Ken Kanomata, Hidetoshi Saito, Taro Abe, Yuki Saito and Hiroyuki Hama, Int J Magnetics Electromagnetism 2017 (2017), 3:007. 査読有

2. "NUMERICAL STUDY OF CHERENKOV RADIATION FROM THIN SILICA AEROGEL", H. Hama, K. Nanbu, H. Saito, Y. Saito, Proc. of 38th International Free Electron Laser Conference, (2017) pp471-473. 査読無 doi:10.18429/JACoW-FEL2017-WEP027

3. "Evaluation of the extremely short electron bunch length measurement with Cherenkov radiation", 齊藤 悠樹, 柏木 茂, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 西森 信行, 武藤 俊哉, 南部 健一, 柴崎 義信, 高橋 健, 長澤 育郎, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 濱 広幸, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2017) pp126-129. 査読無

4. "Development status of Linear Focal Cherenkov Ring Camera", K. Nanbu, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, I. Nagasawa, K. Takahashi, H. Saito, T. Abe, C. Tokoku and H. Hama, Proc. of IPAC16, (2016) pp152-154, 査読無 ISBN 978-3-95450-147-2

[学会発表](計8件)

1. "Bunch length measurement system for ultra-short electron bunch using Cherenkov radiation" Yuki Saito, Kenichi Nanbu, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Ken Kanomata, Sadao Miura, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Shingo Ninomiya, Nobuyuki Nishimori*, Hirotoshi Saito, Ken Takahashi and Hiroyuki Hama, Workshop on CSR and FELs from ultra-short bunch electron beams, 2018年3月(National Synchrotron Radiation Laboratory, Hefei, China)

2. 「屈折率シリカエアロゲル薄膜からのチェレンコフ光を用いたサブピコ秒バンチ長計測」南部 健一, 齊藤 悠樹, 第24回 FELとHigh Power Radiation研究会, 2018年2月(京都大学宇治キャンパス、京都府)

3. "Evaluation of the extremely short electron bunch length measurement with Cherenkov radiation", 齊藤 悠樹, 柏木 茂, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 西森 信行, 武藤 俊哉, 南部 健一, 柴崎 義信, 高橋 健, 長澤 育郎, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 濱 広幸, 第14回日本加速器学会年会、2017年8月(北海道大学、北海道) WEOM04

4. "Study of Cherenkov radiation from thin silica-aerogel", Kenichi Nanbu, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hirotoshi Saitoh, Taro Abe, Yuki Saitoh and Hiroyuki Hama, 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 2016年12月(Udonthani, Thailand)

5. "Beam diagnostics using Cherenkov radiation from a thin silica-aerogel", Kenichi Nanbu, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hirotoshi Saitoh, Taro Abe, Yuki Saitoh and Hiroyuki Hama, The 1st International Workshop on CSR and free electron lasers from ultra-short bunch electron beam, 2016年9月(京都大学宇治キャンパス、京都府)

6. 「LFC カメラ用チェレンコフラジエーターのビーム試験」, 南部健二, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 長澤育郎, 高橋健, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 齊藤悠樹, 濱広幸, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 8 月 (幕張メッセ国際会議場、千葉)

7. 「縦方向位相空間測定のための LFC カメラの開発」, 南部健二, Anusorn Lueangaramwong, 日出富士雄, 柏木茂, 武藤俊哉, 柴崎義信, 高橋健, 長澤育郎, 東谷千比呂, 永沢聡, 齊藤寛峻, 濱広幸, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 (東北学院大学、宮城県)

8. 「LFC カメラ用チェレンコフラジエーターの評価」, 南部健二, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 長澤育郎, 高橋健, 東谷千比呂, 小林恵理子, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 濱広幸, 第 12 回日本加速器学会年会, プラザ萬象 (敦賀市), 2015 年 8 月,

6 . 研究組織

(1)研究代表者

南部 健一 (NANBU KEN-ICHI)

東北大学・電子光理学研究センター

技術専門職員

研究者番号 : 00422072